ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 13, 2009. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE CELDAS FOTOVOLTAICAS POR MAPEO DE FOTOCORRIENTE.

H. Cossutta, K. Taretto,[1] M. Troviano, y C. Canal.
Universidad Nacional del Comahue–CONICET. Buenos Aires 1400. 8300 Neuquén.
Tel. 0299-4488305 e-mail: ktaretto@uncoma.edu.ar

RESUMEN: el siguiente trabajo describe el diseño de un sistema automático para la caracterización de celdas solares mediante mediciones de fotocorriente basadas la técnica de corriente inducida por un haz de luz o LBIC (*Light Beam Induced Current*). El sistema implementado consta de una mesa de microposicionamiento en los ejes *x* e *y* con una resolución máxima de 2 µm, de un diodo láser con elementos de enfoque como fuente de iluminación puntual y un medidor de fotocorriente. El proceso completo de medición de fotocorriente en función de la posición se realiza electrónicamente de manera automática y es configurado completamente por un operador desde una computadora mediante el ingreso de parámetros específicos en una interfaz gráfica diseñada. Se presentan ensayos y mediciones realizadas con el dispositivo terminado sobre celdas solares de silicio multicristalino industriales, hallando distintos tipos de defectos e inhomogeneidades electrónicas.

Palabras clave: LBIC, celdas solares, fotovoltaica, silicio multicristalino, diseño con microcontroladores, mecanismos de alta resolución.

INTRODUCCIÓN

El diagnóstico de la homogeneidad de celdas fotovoltaicas es de fundamental importancia a la hora de diseñar y perfeccionar procesos de fabricación de celdas solares eficientes (Holst, 2008; Salinger et al., 2008; Schmidt et al., 2007; Sites y Tagle, 2005). Un método de caracterización difundido y ampliamente utilizado es el método LBIC (*Light Beam Induced Current*) de mapeo de fotocorriente inducida por un haz de luz (Salinger et al., 2008; Schroder. 2006), ya que proporciona un vínculo directo entre la inhomogeneidad local de las celdas fotovoltaicas policristalinas y el rendimiento de las mismas (Sites y Tagle, 2005; Hiltner y Sites, 2000). Aquí se expone el diseño y desarrollo de un sistema LBIC electromecánico automático, controlado electrónicamente a través de una PC, que realiza el escaneo de celdas solares mediante la medición de la corriente de corto circuito en una grilla de puntos de la misma, determinados por el usuario. El diseño se orienta a realizar un barrido discreto de manera automática sobre el plano dado por los ejes cartesianos *x* e *y*, con una resolución menor o igual a 10 µm entre puntos del barrido; a disponer de una fuente de luz estabilizada que incida puntualmente sobre la celda; a ser capaz de medir y almacenar el valor de la fotocorriente que entregará la fotocélula debido a la incidencia de luz en cada posición; y a que las mediciones se puedan configurar mediante una PC por un usuario a través de un software diseñado para ello. La Fig. 1 muestra un esquema del sistema, dividido en tres subsistemas fundamentales para su explicación: sistema mecánico, sistema electrónico y sistema computacional. En la siguiente sección se describen los distintos subsistemas, luego presentamos mediciones realizadas sobre celdas solares comerciales con el sistema terminado, y finalmente arribamos a las conclusiones.

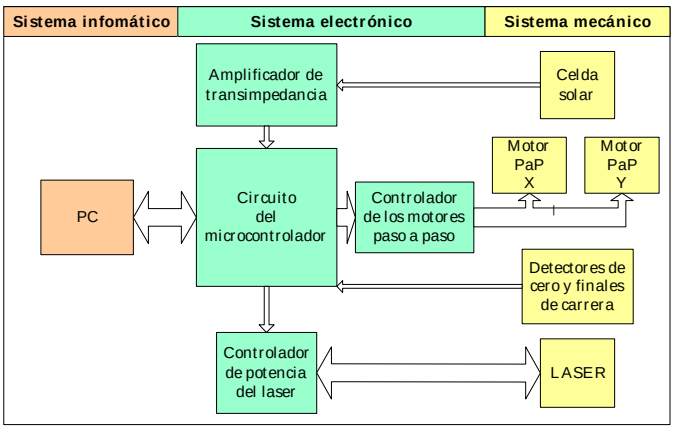

Figura 1: Esquema de subsistemas del sistema completo. La fila superior denota los sistemas informático, electrónico y mecánico, cuyos componentes principales se hallan dispuestos verticalmente bajo el mismo color.

[1] Investigador adjunto CONICET

SISTEMA MECÁNICO

La Fig. 2 muestra el sistema mecánico implementado, mostrando la utilización de tres rieles con carros de precisión dispuestos en forma de "H", en la que dos rieles se ubican paralelos y fijos a la base y el tercero está montado sobre éstos de manera que su carro pueda deslizarse en forma perpendicular a ambos. Se ha considerado que esta disposición es la más adecuada debido a la estabilidad que se logra en el riel superior, la cual es requerida para el enfoque del diodo láser acoplado al carro de este riel. Para el sistema de tracción se han utilizado dos motores paso a paso, ya que se consideró que, para movimientos de precisión por paso, estos son los más adecuados dado que el error producido en sus movimientos no es acumulativo.

Debido a que se requieren desplazamientos del orden de µm, deben utilizarse reducciones, pero para movimientos discretos y de precisión no son útiles las reducciones mediante sistemas de engranajes por el juego que se genera en ellos. Por lo tanto, se ha escogido un sistema de tracción-reducción basado en una varilla roscada y una tuerca, como los sistemas de tornillo sinfín. Si se divide la vuelta completa del eje en un número n de pasos, la tuerca avanzará una distancia de la separación entre filetes dividida en n. Si se toma como a la distancia entre filetes de la varilla y n el número de pasos en que se divide el giro completo, la distancia d que recorre la tuerca por cada paso del motor viene dada por $d = a/n$. Se han utilizado motores paso a paso de 400 pasos por vuelta (0,9° por paso) y varillas roscadas de 32 filetes por pulgada, con lo cual se ha logrado un avance longitudinal en ambos ejes de $d = 1{,}98$ µm ≈ 2 µm de resolución máxima por paso. Al programar un recorrido de 9,6 cm en el eje x y 18,2 cm en el eje y, medimos el recorrido real con un calibre de 20 µm de resolución, obteniendo un error relativo porcentual máximo de 0,8 %.

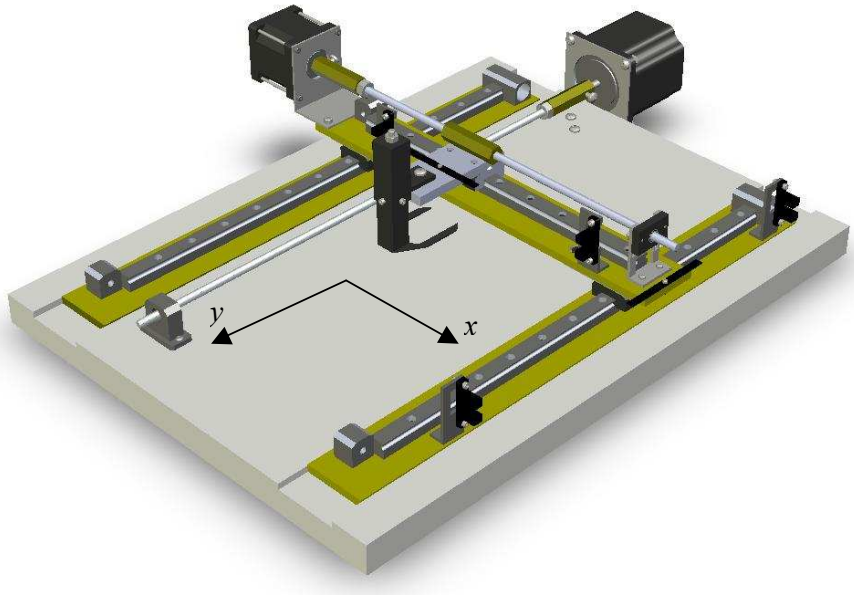

Figura 2: imagen a escala del mecanismo construido. Se observan tres rieles formando la letra H, cada uno de los cuales posee un carro deslizable. El riel transversal (dirección x) va montado sobre los carros de los rieles longitudinales (y). Se aprecian también los dos motores paso a paso solidarios a las varillas roscadas y los finales de carrera en los extremos de cada sentido de movimiento. Imagen diseñada mediante SolidWorks 2007 (SolidWorks, 2009).

Se ha decidido utilizar motores paso a paso unipolares debido a que se consideró que:

- su control es más simple, ya que solamente se requieren cuatro transistores por motor para manejarlos, mientras que los bipolares requieren de al menos ocho transistores o circuitos integrados específicos (puentes H para invertir la polaridad de las bobinas de su estator);
- en caso de averías en el circuito de control la detección y reparación de fallas sería sencilla y el recambio de componentes no presentaría ningún problema ya que son componentes discretos de amplia disponibilidad en el mercado;
- el costo de estos motores es prácticamente el mismo que el de los bipolares (en realidad siempre es ligeramente inferior, debido a que para el mismo modelo los unipolares siempre son de menor potencia).

La medición es realizada dentro de un área rectangular de la celda siguiendo un camino en forma de serpiente. La fuente de iluminación puntual utilizada es un diodo láser enfocado mediante un módulo o PICK-UP de lectora DVD, ya que estos cabezales están provistos de componentes ópticos tales que permiten un diámetro de foco del orden de la longitud de onda (0.65 µm) de la luz, y además actúan como disipadores térmicos de calor para el diodo. El diodo láser utilizado es L-HLDP650, cuya longitud de onda es 650 nm, con una potencia nominal de 5 mW en encapsulado metálico TO-18 de 3 pines.

SISTEMA ELECTRÓNICO

El sistema electrónico se divide en 7 etapas: una fuente conmutada de alimentación, un circuito que dispone de un microcontrolador el cual se encarga de la automatización de la medición, un circuito para la comunicación entre el microcontrolador y la PC, una etapa para la detección de llegada a cero y tope, un circuito controlador de los dos motores paso a paso, un circuito que controla la corriente del láser para mantener la potencia de luz emitida por este último constante y un circuito amplificador que toma la corriente de cortocircuito que entrega la celda cuando es iluminada, la trasforma en tensión, la amplifica y envía esta señal analógica al microcontrolador para su digitalización y procesamiento.

La automatización del sistema de medición se ha implementado electrónicamente mediante un microcontrolador PIC 18F4550. El diagrama de bloques de la Fig. 3 representa el sistema electrónico total y sus interrelaciones con el sistema general.

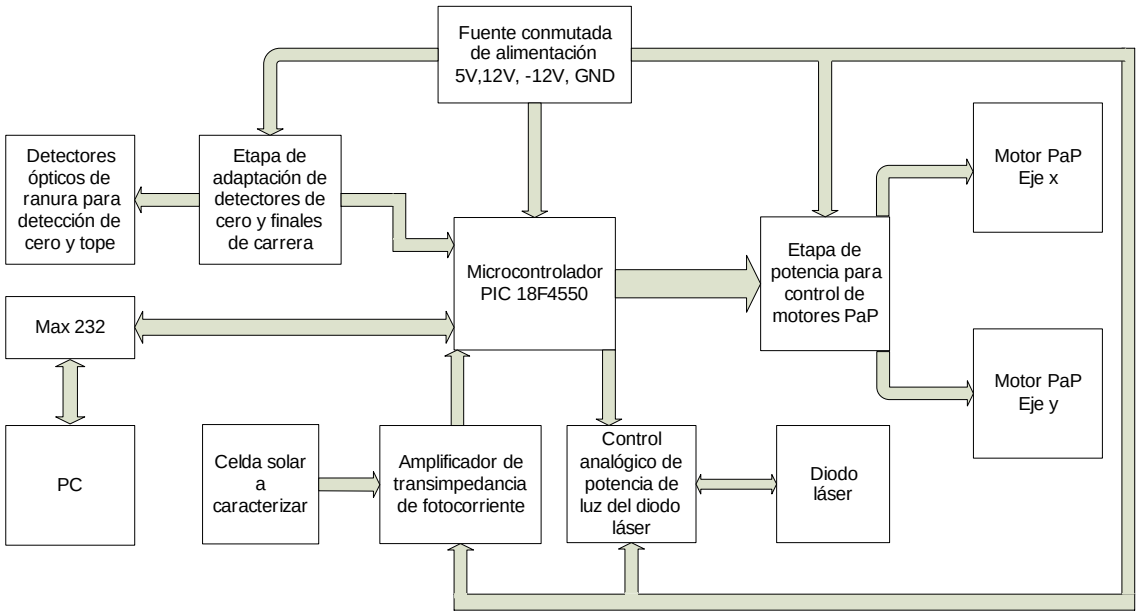
Fuente conmutada de alimentación 5V,12V, -12V, GND
Detectores ópticos de ranura para detección de cero y tope
Etapa de adaptación de detectores de cero y finales de carrera
Microcontrolador PIC 18F4550
Etapa de potencia para control de motores PaP
Motor PaP Eje x
Motor PaP Eje y
Max 232
PC
Celda solar a caracterizar
Amplificador de transimpedancia de fotocorriente
Control analógico de potencia de luz del diodo láser
Diodo láser

Figura 3: diagrama en bloques del sistema electrónico.

El microcontrolador recibe los parámetros de la medición ingresados por el usuario en la interfaz gráfica de control diseñada en Visual Basic 6 en la PC, a través de un bus de comunicaciones RS-232 mediante un protocolo diseñado específicamente. Para la adaptación de niveles de tensión entre ambos se utilizó un circuito integrado MAX232. Todas las mediciones comenzarán siempre en una posición fija la cual se encuentra determinada por detectores de barrera infrarrojos montados en el mecanismo. Mediante un circuito de adaptación de niveles el microcontrolador censa el estado de estos sensores.

El movimiento de los motores paso a paso se produce mediante una secuencia de pulsos aplicada a cada en sus bobinas, la cual es generada por el PIC y amplificada por un circuito controlador de motores diseñado, el cual maneja los dos motores entregando tensiones de 12 V y corrientes de hasta 1,5 A.

En los puntos de medición el microcontrolador entrega una señal de encendido al circuito de control de potencia del diodo láser, y, mediante la realimentación de la fotocorriente entregada por el fotodiodo monitor del diodo láser, controla la corriente del láser y mantiene la potencia de luz emitida constante. Transcurrido el tiempo de estabilización del proceso anterior, se realiza la medición de fotocorriente generada en la celda solar a caracterizar al ser iluminada localmente, mediante la conversión analógica digital la señal convertida a tensión, amplificada por un amplificador de instrumentación integrado, el AD620, y adaptada a los niveles de 0 y 5 V por el circuito amplificador de transimpedancia que actúa como conversor de corriente a tensión, amplificador, adaptador de niveles y protección para la entrada del conversor A/D de 10 bits del microcontrolador. El rango de corrientes medibles con el instrumento es de 0 a 1200 µA, el cual es suficiente para la detectar las fotocorrientes que emitirá una celda solar al ser iluminada por el diodo láser; y se a logrado reducir el error en esta medición mediante la simple aplicación de un filtro de promedio de 20 muestras por punto en las conversiones A/D, desde un valor máximo de ± 9 µA a ± 0,6 µA. Este filtro está aplicado por soft, dentro del programa cargado en el microcontrolador y consiste básicamente en realizar 20 conversiones analógico/digitales en cada punto de medición y realizar la media aritmética de los valores convertidos.

El tiempo total de cada punto de medición, es decir el tiempo que transcurre entre que el láser se enciende en una posición de medida y se estabiliza la potencia de luz emitida, más el retardo del amplificador de transimpedancia, y el tiempo de la conversión analógica - digital es de 6,34 ms (aplicado el filtro de promedio de 20 muestras). De estos 6,34 ms, 0,356 ms se ocupan en las 20 conversiones realizadas por el filtro. Cada paso de motor, es decir un avance longitudinal de 2 µm, requiere 1,5 ms.

INTERFAZ GRÁFICA

La interfaz gráfica es un programa diseñado en Visual Basic 6, desde ésta el operador puede configurar el puerto COM de comunicaciones, ingresar los parámetros para la medición, los cuales son la posición de inicio y fin que definen el área rectangular de barrido, el paso de medición para ambos ejes, y realizar los comandos de llevar a cero el mecanismo, comenzar y detener la medición, configurar el archivo de texto donde se almacenarán las mediciones de fotocorriente junto con la posición a la cual fueron tomadas. En la misma pantalla se muestra el estado del dispositivo en todo momento, y se visualizan tanto numérica como gráficamente los valores de las mediciones en tiempo real. También se muestra el tiempo que transcurre durante el proceso de medición. Desde la barra de herramientas el usuario tiene acceso al *Manual del Usuario* del sistema.

RESULTADOS

Con el dispositivo terminado y habiendo ensayado cada parte que lo compone se han realizado mediciones sobre celdas solares de silicio multicristalinas de la firma alemana Manz Automation AG (Manz, 2009), de 15×15 cm^2 de área, texturadas químicamente mediante ácidos y grilla de contactos aplicada por serigrafía. A continuación mostramos mapas de fotocorriente típicos adquiridos mediante el dispositivo presentado.

En la Fig. 4 se presenta una medición de 4 cm × 3 cm con una resolución de 100 µm en ambos ejes, en la que el escaneo comenzó en el vértice inferior derecho. La barra de colores de la derecha indica cualitativamente los valores de corriente. Las líneas negras que atraviesan el área corresponden a los dedos de contacto, los cuales poseen un ancho aproximado de 200 µm. Notamos que los dedos aparentemente se ensanchan hacia arriba. Este efecto se debe a un desenfoque óptico introducido probablemente por una ligera inclinación de la muestra, la cual se hace evidente en este tipo de mediciones con grandes superficies. En esta imagen LBIC apreciamos una variedad de defectos e inhomogeneidades. Encontramos defectos puntuales, cadenas o líneas de defectos, y líneas de ligero contraste que atraviesan horizontalmente la imagen. Estas últimas corresponden a bordes de grano y son apreciables a simple vista ya que los granos en forma de filamento de este material son macroscópicos. La medición correspondiente a esta imagen se compone de 120400 puntos, para los cuales el sistema tardó 3 h 12 min.

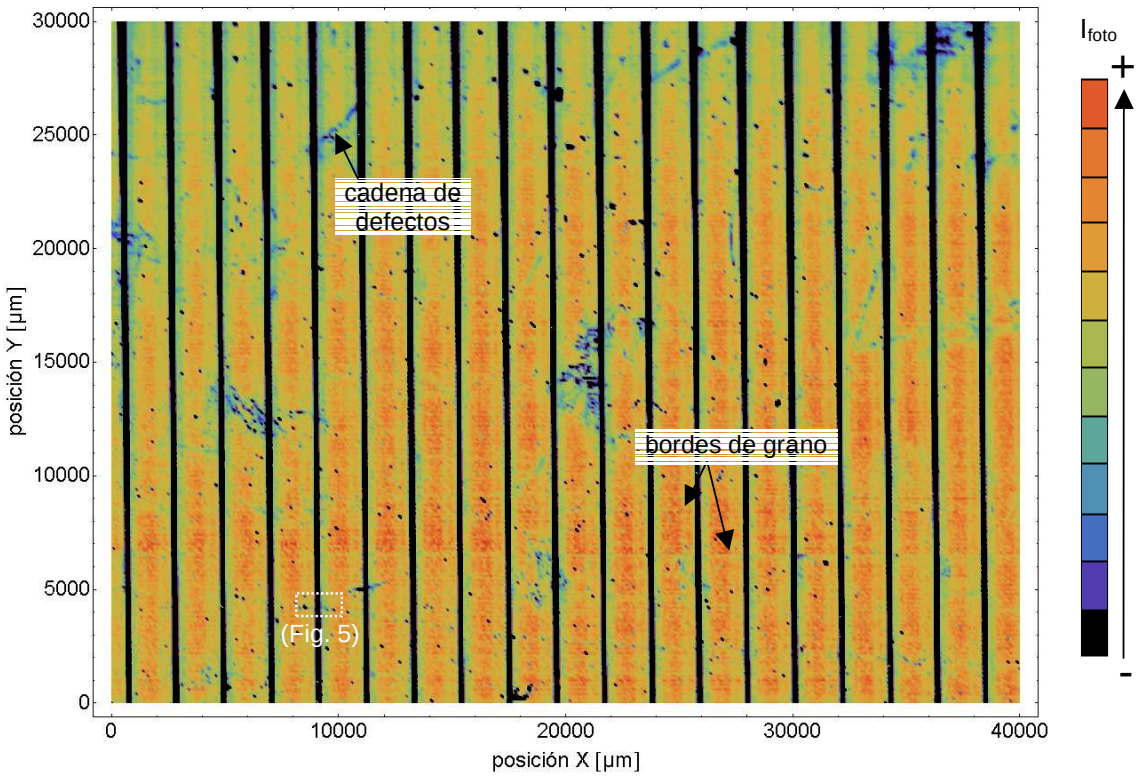

Figura 4: Resultado al escanear un área 4 cm × 3 cm de una celda policristalina con una resolución de 100 µm tanto en el eje x como en el eje y.

En la Fig. 5 observamos un acercamiento de la zona punteada con línea blanca de la Fig. 4 donde sólo tenuemente se apreciaba un defecto. Al realizar este nuevo escanéo, ahora con una resolución de 4 µm, detectamos claramente una cadena de defectos que va de un lado a otro de un dedo de contacto. Esta medición de 0,5 mm × 2 mm requirió un tiempo de medición de 20 min, con 63000 puntos.

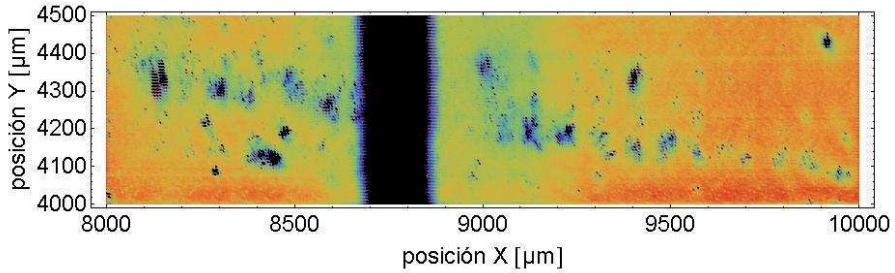

Figura 5: medición de 2 mm × 0,5 mm con paso de 4 µm en ambos ejes, donde se aprecia una cadena de defectos puntuales en la celda que atraviesa un dedo de contacto, prácticamente invisible al utilizar la resolución de 100 µm con que fue tomada la imagen de la Fig. 4.

En la Fig. 6 se presenta una medición realizada en otra zona completamente diferente de la celda correspondiente a la Fig. 4, abarcando una región de 1,6 mm × 1,6 mm con paso de 8 µm en ambos ejes (40400 puntos). Apreciamos granos con forma de filamento que atraviesan horizontalmente la imagen. La región vertical azulada de la izquierda se halla cerca un dedo de contacto (ausente en la figura), sugiriendo que cerca de los mismos la calidad electrónica disminuye. Esto es válido para cualquier grano de los que se encuentran en la imagen, y además respeta cualitativamente las diferencias de fotocorriente entre grano y grano halladas en el interior, lejos de los contactos (por ejemplo en el centro de la imagen). Análisis más detallados se necesitarían para determinar si las diferencias son directamente proporcionales entre las zonas cercanas al contacto y el interior para diferentes granos. La disminución de la fotocorriente cerca de los dedos de contacto también se observa en las figuras 4 y 5, pero resulta menos visible debido a la escala utilizada. En la Fig. 6, también hallamos numerosas cadenas de defectos y defectos puntuales.

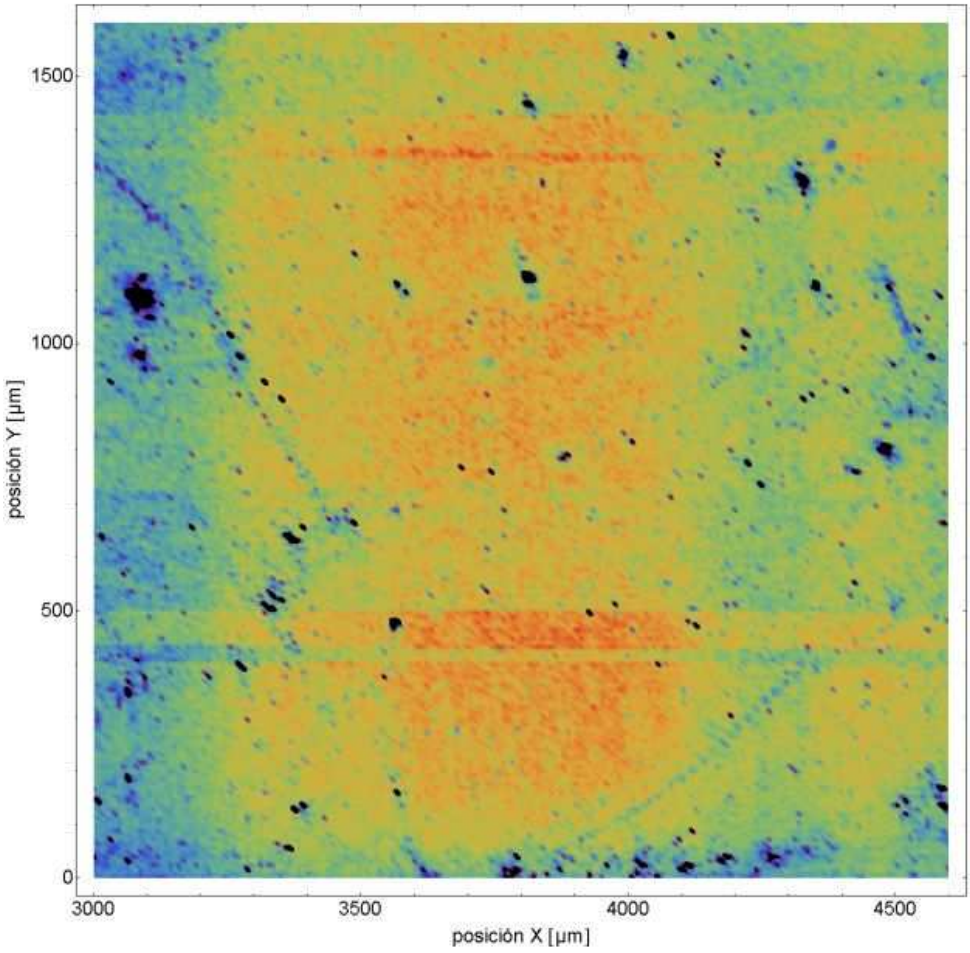

Figura 6: medición de 1,6 mm × 1,6 mm con paso de 8 µm en ambos ejes, donde se aprecian granos cristalinos con forma de filamento, dispuestos horizontalmente. Se aprecian también numerosas cadenas de defectos y defectos puntuales. Cerca del eje vertical a la izquierda se hallaba un dedo de contacto.

CONCLUSIONES

Presentamos el diseño, desarrollo e implementación de un dispositivo para mediciones de *light beam induced current* (LBIC) de manera automática. El sistema de LBIC es totalmente automatizado, consta de un mecanismo microposicionador *x*-*y* de resolución máxima de 2 µm en ambos ejes con un área máxima de barrido de 9,6 cm en el eje *x* y 18,2 cm en el eje *y*, con un error relativo porcentual máximo de 0,8 %. Este mecanismo es controlado electrónicamente mediante un microcontrolador que recibe órdenes ingresadas en una computadora por un operador mediante una interfaz gráfica, un medidor de fotocorriente y un láser con elementos de enfoque y control de potencia de luz como fuente de iluminación puntual. El rango de corrientes medibles con el instrumento es de 0 a 1200 µA, con un error instrumental máximo de ± 0,6 µA.

Se han realizado mediciones sobre celdas solares comerciales de silicio multicristalino industriales, revelándose imperfecciones puntuales resueltas hasta tamaños de sólo 8 µm, cadenas de defectos puntuales, granos y bordes de grano. La capacidad de escanear con alta resolución del dispositivo permitió medir mapas de LBIC con paso amplio, detectar zonas de interés y luego zonas específicas en donde se volvieron a hacer mapeos LBIC con alta resolución para revelar detalladamente zonas defectuosas.

REFERENCIAS

Hiltner J. F. y Sites J. R. (2000). High Resolution Laser Stepping Measurements On Polycrystalline Solar Cells. 16th EU-PVSEC, pp. 630-633.

Holst G. (2008). Building Better Solar Cells with Cameras. Photonics Spectra, pp. 38-39.

Manz Automation AG (2009). http://www.manz-automation.com

Salinger J., Benda V. y Machacek Z. (2008). Solar Cell Diagnostics Using LBIC and LBIV Methods. Proceedings 26th International Conference on Microelectronics MIEL 2008, vol. 1, pp. 217-220.

Schmidt J., Pohl P., Bothe K. y Brendel R. (2007). Advances in Contactless Silicon Defect and Impurity Diagnostics Based on Lifetime Spectroscopy and Infrared Imaging. Advances in optoelectronics 2007, doi:10.1155/2007/92842.

Schroder D. K. (2006). Semiconductor Material and Device Characterization, 3ra edición, pp. 417, Wiley Interscience, New York.

Sites J. y Nagle T. (2005). LBIC Analysis Of Thin-Film Polycrystalline Solar Cells. Proceedings 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conf., pp. 199-204.

SolidWorks (2009). http://www.solidworks.es

ABSTRACT: The present work describes the design, development and implementation of an automatic system for the characterization of solar cells by the Light Beam Induced Current (or LBIC) technique. The implemented system consists of a laser head capable to be positioned along *x* and *y* axes with a maximum resolution of 2 µm, a laser diode as a source of punctual lighting provided with focusing components, and a photocurrent meter. The whole process of measuring is performed in an automatic way and controlled by a microcontroller. The measuring procedure is configured completely by an operator from a computer through the entry of specific parameters in a specifically designed graphical interface. We present measurements made with the finished device on industrial multicristalline silicon photovoltaic cells, finding different types of electronic inhomogeneities and defects in the cells.

Keywords: LBIC, solar cells, photovoltaic, multicristalline silicon, microcontrollers, mechanisms of high resolution.